

# 大气波导条件下雷达海杂波功率仿真\*

赵小峰<sup>†</sup> 黄思训

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2012年8月23日收到; 2013年1月11日收到修改稿)

考虑近海面大气折射率垂直梯度的变化, 采用曲面波频谱估计方法(CWSE)计算掠射角, 并结合修正的GIT海表反射率模型和雷达距离方程对大气波导条件下雷达海杂波功率进行仿真, 最后通过数值实验及与实测数据比较, 验证了CWSE方法的可行性.

**关键词:** 大气波导, 雷达海杂波, 曲面波频谱估计

**PACS:** 92.60.Ta, 84.40.Xb

**DOI:** 10.7498/aps.62.099204

## 1 引言

海洋大气波导的存在一方面为实现岸基和舰载雷达的超视距探测提供了有利条件, 另一方面, 雷达作用距离的延伸也意味着有可能探测到更远处的杂波, 削减了雷达的信噪比, 从而影响了雷达对海面目标物的有效监测<sup>[1]</sup>. 雷达性能指标的设计通常基于标准大气折射条件, 大气波导条件下雷达海杂波的精确仿真对正确评估雷达对海面目标物的监测性能非常重要, 其中关键的一步是计算海表反射率  $\sigma^0$ <sup>[2-7]</sup>.

基于大量实验观测数据和理论分析, 目前国际上已提出多个海表反射率经验模型: SIT模型、TSC模型、HYB模型和GIT模型, 其中SIT模型只适用于X波段和Ku波段, 而其他三种模型适用于更宽广的频率范围<sup>[8]</sup>. 附录给出GIT模型的数学表达式, 其余模型的表达式可查阅文献[8]. 图1给出TSC模型、HYB模型和GIT模型在不同风速(或平均浪高)条件下海表反射率  $\sigma^0$  随掠射角  $\varphi$  的变化, 其中雷达发射频率为2.9 GHz(S波段), 极化方式为垂直极化, 水平风向与雷达入射电磁场能流密度方向的夹角为90°. 与发射水平极化电磁波的雷达不同的是: 发射垂直极化电磁波的雷达, 入射波

能流密度本身会随着掠射角(或仰角)不同而变化.

从图1中可以看出: 海表反射率随着风速和掠射角的增大而增大. 三种模型在掠射角大于1°时(尤其是在高风速条件下)符合得较好, 而在低掠射角条件下, GIT模型计算得到的海表反射率值要明显小于其他两种模型的计算结果. 这主要是由于: 用于确定GIT模型参数的观测数据是在标准或近标准大气折射条件下收集的, 而其他两种模型的观测数据则反映了更广泛的大气条件(包括大气波导传播条件)<sup>[8,9]</sup>. 如果大气传播条件未知, 建议采用TSC或HYB模型计算海表反射率; 当传播条件已知时, 可以采用标准大气传播条件下的传播因子对GIT模型海表反射率进行归一化处理, 得到修正的GIT海表反射率模型<sup>[10]</sup>:

$$\sigma^0(\varphi) = \frac{\sigma_{\text{GIT}}^0(\varphi)}{F_s^4(\varphi)}, \quad (1)$$

其中,  $\sigma_{\text{GIT}}^0$  为采用GIT模型计算得到的海表反射率(见附录);  $\sigma^0$  为修正的海表反射率;  $F_s^4$  是标准大气传播条件下与掠射角  $\varphi$  相对应的距离上计算得到的双程传播因子. 采用(1)式进行计算首先要正确估计掠射角  $\varphi$ . 从图1中可以看出, 在低风速条件下,  $\varphi$  从0.1°变化到1°,  $\sigma_{\text{GIT}}^0$  的变化范围达到近50 dB; 在高风速条件下,  $\sigma_{\text{GIT}}^0$  的变化范围也有40 dB.

\* 国家自然科学基金(批准号: 41175025, 41105012, 41275113)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zxf\_best@126.com

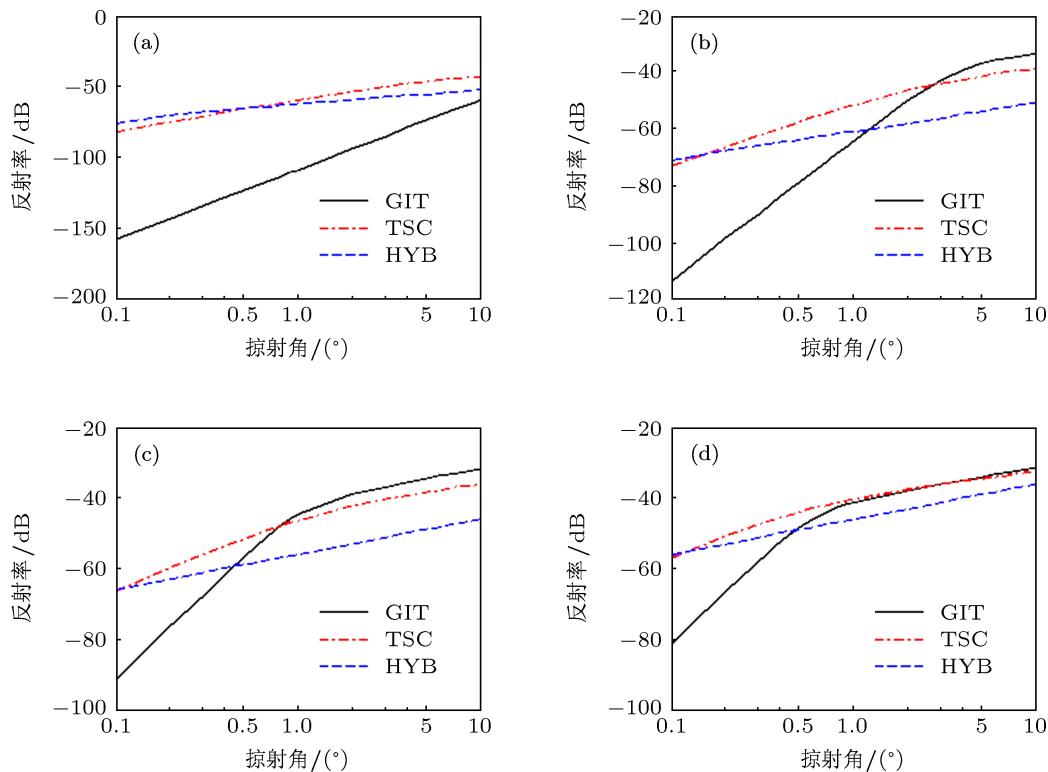


图 1 海表反射率随掠射角和风速的变化 (a) 2 m/s; (b) 5 m/s; (c) 8 m/s; (d) 10 m/s

大气波导传播条件下, 电磁波被陷获在波导层内来回反射向前传播, 如何估算掠射角  $\varphi$  随传播距离的变化一直是一个难题 [9–13]. 传统计算方法有几何光学法 (geometric optics, GO)<sup>[14]</sup> 和平面波频谱估计方法 (plane wave spectral estimation, PWSE)<sup>[15]</sup>. GO 实施起来比较方便, 但其只有在简单的波导结构条件下 (如蒸发波导) 才能得到较精确的估计结果, 当波导结构较复杂时, 由于电磁波的多路径干涉效应和波导的多模态传播, 使得计算得到的掠射角有较大误差<sup>[12–14]</sup>. 另一方面, GO 方法与频率无关, 而通常大气波导对电磁波的陷获作用都存在一个极限频率, 如: 蒸发波导的最低陷获频率为 1—2 GHz<sup>[14]</sup>. PWSE 方法首先通过求解电磁波抛物方程 (parabolic equation, PE) 得到电磁场在二维空间的全波解, 再采用频谱估计技术对任意距离处的场强进行分析, 得到掠射角随距离的变化. PWSE 在计算过程中假设近海面大气折射率为常数, 当近海面大气折射率梯度较大时, PWSE 失效<sup>[12,15]</sup>.

本文借鉴海洋声波传播中的最新研究进展, 采用曲面波频谱估计方法 (curved wave spectral estimation, CWSE) 计算掠射角<sup>[16]</sup>, 该方法可以有效地克服 PWSE 中近海面大气折射率参数为常数的假

设, 充分考虑由于大气折射率梯度的变化而引起掠射角随距离的变化. 文章第二节对 CWSE 方法作了简要介绍, 第三节对 CWSE 的有效性进行检验, 检验分为两部分: 1) 在蒸发波导条件下, 将 CWSE 计算得到的掠射角与 GO 计算得到的掠射角进行比较; 2) 在实际大气传播条件下采用 CWSE 计算掠射角, 并将此掠射角代入海杂波功率模型, 结合相应条件下观测的海杂波数据, 对 CWSE 的有效性进行验证.

## 2 曲面波频谱估计方法

PWSE 是 CWSE 的一个特例. 假设近海面大气折射率为常数 (或电磁波在大气中的传播速度为常数), 则与掠射角  $\varphi$  对应距离处垂直方向相邻场强之间的相位差  $\Delta\phi$  也为一个常数<sup>[9]</sup>. 从海表面到任意高度场强处的相位差可通过下式计算得到:

$$\phi_l(\varphi) = l\Delta\phi = l\frac{2\pi}{\lambda}\Delta z \sin \varphi, \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  为电磁波波长;  $\Delta z$  为相邻场强之间的高度差,  $l$  为非负整数. 实际大气垂直分层显著, 当近海面大气折射率梯度较大时, 需采用积分代替求和来

计算相位差  $\phi_l^{[16]}$ ,

$$\phi_l(\varphi) = \int_{z_0}^{z_l} k_v(z, \varphi) dz, \quad (3)$$

$$k_v(z, \varphi) = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{n^2(z) - n^2(z_0) \cos^2(\varphi)}, \quad (4)$$

其中,  $\omega$  为角频率;  $c_0$  为电磁波在真空中的传播速度;  $z_0$  为海面高度,  $n(z_0)$  为海面大气折射指数. 注意到  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为雷达发射频率;  $n = c_0/c$ ,  $c$  为实际大气中电磁波传播速度;  $c = \lambda f$ . 当  $n$  为常数时, (2) 式和 (3) 式相等.

二维空间任意距离  $x$  和高度  $z$  处的场强可采用分步傅里叶算法求解 PE 得到 [17,18]

$$\begin{aligned} u(x_{k+1}, z) = & \exp \left\{ i \frac{k_0}{2} [m^2(x, z) - 1] \delta x \right\} \\ & \times F^{-1} \left\{ \exp \left( -i \frac{p^2 \delta x}{2k_0} \right) \right. \\ & \left. \times F \{ u(x_k, z) \} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $u$  为电磁场强度;  $k_0$  表示自由空间波数;  $m$  表示大气修正折射指数, 定义为  $m = n + z/a_e$ ,  $a_e$  表示地球半径;  $F[\cdot]$  和  $F^{-1}[\cdot]$  分别表示 Fourier 变换和 Fourier 逆变换;  $p$  表示 Fourier 变换变量, 通常取为垂直波数, 由 Nyquist 定理确定 [17]; 初始距离  $x_0$  处的场强可由雷达系统参数确定.

由于入射能与掠射角之间的相关性, 当得到二维空间电磁场强度, 可采用频谱分析法估算掠射角  $\varphi$  随距离的变化. 角度谱功率  $B$  可采用下式计算 [16,19]:

$$B(\theta) = \sum_{l=0}^{N_r} w_l u_l \exp[-j\phi_l(\theta)], \quad (6)$$

$|B|^2$  的峰值对应的角度  $\theta$  即为电磁波入射到海表面的掠射角  $\varphi$ .  $w$  为以中心点在海表面的海明窗函数 (Hamming window),  $N_r$  的取值需满足  $k_v \geq 0$ .

### 3 数值实验分析

#### 3.1 实验 1

在蒸发波导传播条件下, 采用 GO 计算海表面掠射角可以得到较精确的结果 [12]. 为了检验 CWSE 的有效性, 将 CWSE 计算结果与 GO 进行比较.

图 2 给出两种方法在不同蒸发波导高度条件下掠射角随距离的变化. 雷达发射频率为 2.9 GHz, 天线高度为 25 m, 图 2(a) 中蒸发波导高度为 20 m (天线在波导层外), 图 2(b) 中蒸发波导高度为 30 m (天线在波导层内). 蒸发波导结构由线性对数廓线模型确定 [14,20],

$$M(z) = M_0 + 0.125z - 0.125d \ln[(z+h_0)/h_0], \quad (7)$$

其中,  $M$  表示大气修正折射率,  $M = (m-1) \times 10^6$ ;  $M_0$  表示海面大气修正折射率, 一般取值为 340 M-units;  $d$  为蒸发波导高度;  $h_0$  为 Jeske's 粗糙长度,  $h_0 = 1.5 \times 10^{-4}$  m.

图 2 中左图给出蒸发波导折射率廓线结构, 右图给出采用 CWSE 计算出的角度谱功率  $|B|^2$  的二维空间覆盖图, 图中白色实线为采用 GO 计算得到的掠射角随距离的变化 (GO 具体实现过程可参考文献 [14]). 从图中可以看出  $|B|^2$  的峰值对应的角度与 GO 计算得到的掠射角符合得较好, 这表明采用 CWSE 估算掠射角是完全可行的. 当距离大于 10 km 时, 掠射角几乎不变, 这主要是由于蒸发波导的高度较低, 电磁波能量被捕获在很薄的波导层内, 经海表面和波导层顶来回反射向前传播的结果.

CWSE 计算结果完全依赖于大气折射率  $n$  和二维空间电磁场  $u$ , 采用 PE 方程可以精确求解出任意折射环境条件下  $u$  的空间分布. 因此, CWSE 方法可用于计算任意复杂折射环境条件下海面掠射角随距离的变化.

### 3.2 实验 2

正确估算出掠射角随距离的变化是大气波导传播条件下雷达海杂波仿真过程中的关键一步. 由雷达距离方程可知, 在小掠射角条件下雷达接收到的海表面回波功率  $P_c$  可表示为 [10,21–23]

$$P_c(r) = \frac{P_t G^2 \lambda^2 F_p^4}{(4\pi r)^3} \left( \sigma_0 \theta_B \frac{c\tau}{2} \sec \varphi \right), \quad (8)$$

其中,  $P_t$  为雷达发射功率;  $G$  为天线增益;  $\theta_B$  为 3 dB 波束宽度;  $\tau$  为脉冲宽度;  $\varphi$  为距离  $r$  处对应的掠射角;  $\sigma_0$  为归一化海表反射率 (由 (1) 式计算得到);  $F_p^4$  为波导传播条件下掠射角  $\varphi$  对应距离处的双程传播因子. 当掠射角  $\varphi \leq 1^\circ$  时,  $\sec \varphi \approx 1$ .

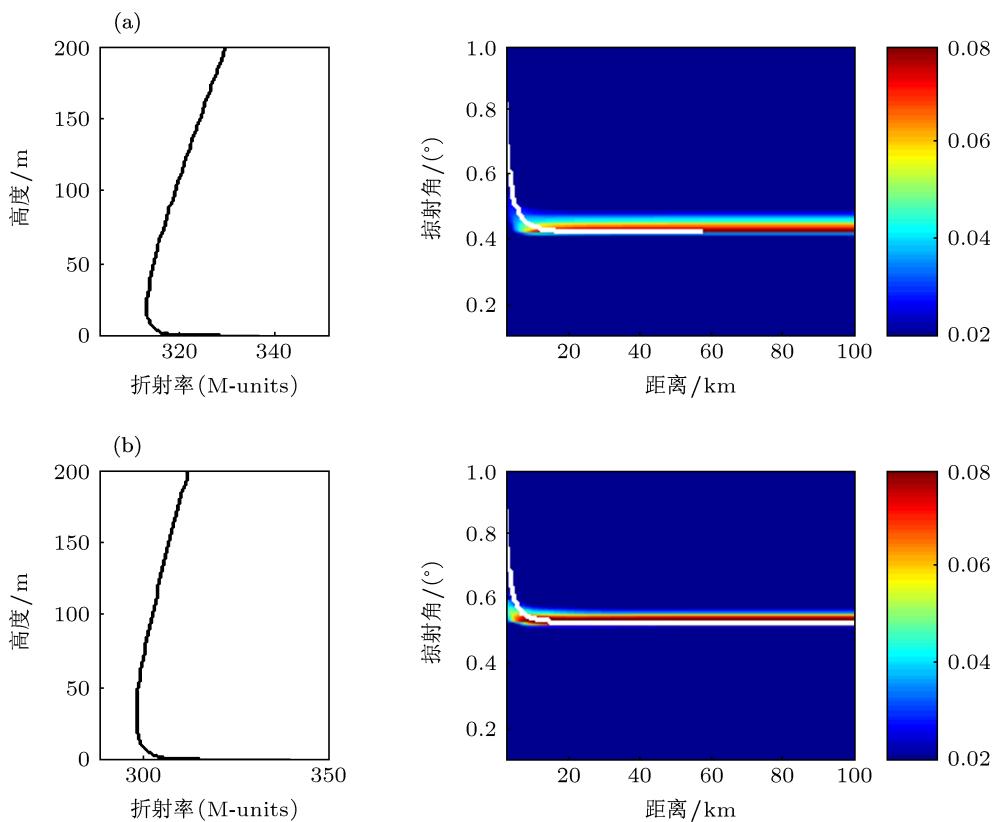


图 2 蒸发波导条件下折射率廓线及掠射角随距离的变化

本文所采用的观测数据来源于 1987 年 9 月由美国海军部门组织的在弗吉尼亚 Wallops 岛进行的海杂波探测实验。实验使用的雷达为空间测距雷达 (space range radar, SPANDAR)，雷达位置距离海岸线 3.7 km，雷达探测的灵敏度 (或阈值) 为 -112 dB，具体雷达参数由表 1 给出。在进行海杂波探测实验期间，采用安装有微波折射计的直升机沿雷达方位角方向飞行探测大气环境参数，采用浮标探测平均浪高  $h_{av}$ 。实验期间  $h_{av}$  的变化范围为 0.3—0.6 m，在计算过程中取其平均值  $h_{av} = 0.45$  m。雷达入射方向与风向的夹角  $\phi$  对海表反射率的影响较小，通常逆风向比顺风向海表反射率值要大近 5 dB，而横风向的值介于两者之间<sup>[14]</sup>，计算中取横风向，即  $\phi = 90^\circ$ 。

图 3 给出 1987 年 9 月 18 日 14:53—15:37 时间段的实验观测数据和海杂波仿真结果。图 3(a) 是由直升机探测到的大气折射率廓线，在陆地上 (0—3.7 km) 折射率廓线的垂直梯度变化不大，接近于标准大气折射条件；在海面上则存在较强的表面波导，且波导结构随着距离的变化而变化。图 3(b)

是基于雷达系统参数和图 3(a) 给出的大气环境参数采用 PE 计算得到的二维空间电磁波传播因子覆盖图，单位 dB。图 3(c) 中灰色区域为实验期间探测到不同距离处的海杂波功率波动幅度范围，黑色实线为采用 (8) 式仿真计算得到的海杂波功率。

表 1 SPANDAR 系统参数

发射频率 /GHz	2.9
天线高度 /m	31
水平波束宽度 /°	0.4
极化方式	垂直极化
峰值功率 /MW	4
脉冲宽度 /μs	0.25
脉冲重复频率 /Hz	320

从图 3(c) 可以看出：仿真得到的海杂波功率除了在 50 km 附近出现陡然下降，在其他距离处与实测数据符合得较好。仿真数据在 50 km 附近处的下降一方面可能来源于观测误差，另一方面也可能是由于波导传播条件下电磁波的多路径干涉效应造成的，这在图 3(b) 中也清晰地反应出来。实际观测

中由于大气环境随机扰动造成的漫散射效应在一定程度上淹没了这种变化,而在仿真过程中我们无法模拟出大气环境的漫散射效应。从图 3(b) 中可以

看出对近海面电磁波传播因素在垂直方向上进行加权平均可以适当改进仿真结果,但这个想法有待于收集更多的实测资料进行验证。

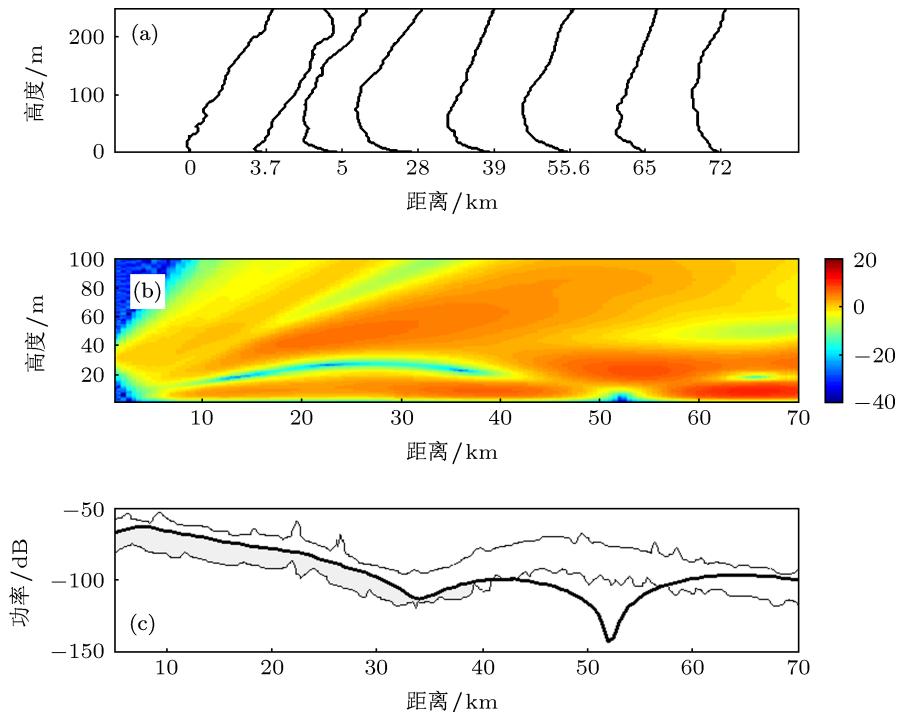


图 3 (a) 1987 年 9 月 18 日 14:53—15:37 探测到的二维空间折射率结构; (b) 电磁波传播因素二维空间覆盖图; (c) 雷达海杂波功率, 灰色区域为探测时间间隔 14:53—15:37 内海杂波功率的波动范围, 黑色实线为仿真得到的海杂波功率

## 4 结 论

复杂大气环境条件下,如何计算海面掠射角随距离的变化一直是一个难题,这也制约了大气波导传播条件下雷达海杂波的精确仿真。为了克服 PWSE 方法中近海面大气折射率参数为常数的假设,本文提出采用 CWSE 方法计算海面掠射角。该方法充分考虑折射率垂直梯度的变化,通过对由 PE 方程计算得到二维空间电磁场进行频谱分析,得到掠射角随距离的变化。蒸发波导传播条件下的数值模拟结果表明:采用 CWSE 方法计算海面掠射角是完全可行的。将由 CWSE 方法计算得到的掠射角代入修正的 GIT 海表反射率模型和雷达距离方程可进一步模拟出雷达接收到的海杂波功率,这可以为提高雷达对海面目标物的监测性能提供技术支撑。

## 附 录 GIT 海表反射率模型

记水平极化和垂直极化条件下海表反射率分别为  $\sigma_v^0$

和  $\sigma_h^0$ ,  $\sigma_h^0$  的具体表达式为

$$\sigma_h^0 = 10 \log(3.9 \times 10^{-6} \lambda \varphi^{0.4} A_i A_u A_w), \quad (A1)$$

其中,  $\lambda$  为电磁波波长, 单位 m;  $\varphi$  为掠射角, 单位 ( $^\circ$ );  $A_i$  为干扰因子;  $A_u$  为风向因子;  $A_w$  为风速因子。

干扰因子  $A_i$  为

$$A_i = \frac{\sigma_\varphi^4}{1 + \sigma_\varphi^4}, \quad (A2)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{14.4\lambda + 5.5}{\lambda} \varphi h_{av}. \quad (A3)$$

风向因子  $A_u$  为

$$A_u = \exp[0.2 \cos \phi (1 - 2.8\varphi)(\lambda + 0.02)^{-0.4}]. \quad (A4)$$

风速因子  $A_w$  为

$$A_w = \left[ \frac{1.9425 V_w}{1 + V_w / 15.4} \right]^{q_w}, \quad (A5)$$

$$q_w = \frac{1.1}{(\lambda + 0.02)^{0.4}}. \quad (A6)$$

在 (A2)–(A6) 式中:  $\phi$  为雷达入射方向与水平风向的夹角, 单位 ( $^\circ$ );  $h_{av}$  为平均浪高, 单位 m;  $V_w$  为风速, 单位 m/s。风速与平均浪高满足关系式,  $V_w = 8.67 h_{av}^{0.4}$ 。

在垂直极化条件下,  $\sigma_v^0$  的具体表达式依赖于雷达发射频率  $f$ :

$$\sigma_v^0 = \begin{cases} \sigma_h^0 - 1.05\ln(h_{av} + 0.02) + 1.09\ln(\lambda) + 1.27\ln(\varphi + 0.0001) + 9.7, & f \geq 3000 \text{ MHz}, \\ \sigma_h^0 - 1.73\ln(h_{av} + 0.02) + 3.76\ln(\lambda) + 2.46\ln(\varphi + 0.0001) + 22.2, & f < 3000 \text{ MHz}. \end{cases} \quad (\text{A7})$$

- 
- [1] Ward K D, Baker C J, Watts S 1990 *IEE Proceedings F* **137** 51  
[2] Huang S X, Zhao X F, Sheng Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5084  
[3] Zhao X F, Huang S X, Sheng Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 049201  
[4] Zhao X F, Huang S X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 029201  
[5] Zhao X F, Huang S X, Xiang J, Shi W L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 099201  
[6] Sheng Z, Huang S X and Zhao X F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6627 (in Chinese) [盛峥, 黄思训, 赵小峰 2009 物理学报 **58** 6627]  
[7] Zhao X F, Huang S X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 119203 (in Chinese) [赵小峰, 黄思训 2011 物理学报 **60** 119203]  
[8] Antipov I 1998 *Simulation of sea clutter returns* DSTO-TR-0679 Commonwealth of Australia  
[9] Reilly J P, Dockery G D 1990 *IEE Proceedings F* **137** 80  
[10] Dockery G D 1990 *IEE Proceedings F* **137** 73  
[11] Pappert R A, Paulus R A, Tappert F D 1992 *Radio Sci.* **27** 189  
[12] Dockery G D, Kuttler J R 1996 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **44** 1592  
[13] Karimian A, Yardim C, Gerstoft P, Hodgkiss W S, Barrios A E 2011 *Radio Sci.* **46** RS6013 doi:10.1029/2011RS004818  
[14] Paulus R A 1990 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **38** 1765  
[15] VanTrees H L 2002 *Optimum array processing* New York: John Wiley and Sons  
[16] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2<sup>nd</sup> Edition) Springer-Verlag  
[17] Kuttler J R, Dockery G D 1991 *Radio Sci.* **26** 381  
[18] Zhao X F, Huang S X 2010 *Radioengineering* **19** 601  
[19] Valtr P, Pechac P 2005 *Radioengineering* **14** 98  
[20] Zhao X F 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 1020  
[21] Skolnik M I 2008 *Radar handbook* (3rd Edn.) New York: McGraw-Hill  
[22] Zhao X F, Huang S X 2012 *J. Atmos. Sci.* **69** 2808  
[23] Zhao X F, Huang S X, D X Wang 2012 *Atmos. Meas. Tech.* **5** 2859

# Radar sea clutter power modeling under the atmospheric duct propagation conditions<sup>\*</sup>

Zhao Xiao-Feng<sup>†</sup> Huang Si-Xun

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 23 August 2012; revised manuscript received 11 January 2013)

## Abstract

Taking into account the variations of the refractivity gradient near the sea surface, We have used the curved wave spectral estimation (CWSE) technique to calculate the grazing angle. CWSE combined with the modified GIT reflectivity model and radar range equation, the radar sea clutter power modeling is performed under the atmospheric duct propagation conditions. Finally, the validation of CWSE is tested through numerical experiments and comparisons with the real measurement data.

**Keywords:** atmospheric duct, radar sea clutter, curved wave spectral estimation

**PACS:** 92.60.Ta, 84.40.Xb

**DOI:** 10.7498/aps.62.099204

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175025, 41105012, 41275113).

† Corresponding author. E-mail: zxf\_best@126.com